기후변화와 식품 중 아플라톡신의 오염 예방 전략

Climate Change and Control Strategies to Support Prevention of Aflatoxins Contamination

옥현이, 심재호, 박기환, 전향숙*

Hyun Ee Ok, Jae Ho Sim, Ki Hwan Park and Hyang Sook Chun*

중학대학교 식품공학부

School of Food Science and Technology, Chung-Ang University

서 론

식품의 안전성에 위협을 가하는 위해인자 가운데 곰팡이독소는 세계 식량 농작물의 25%에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이 가운데 아플라톡신(aflatoxin)은 *Aspergillus flavus*, *Aspergillus parasiticus* 및 *Aspergillus nomius* 등 주로 *Aspergillus section Flavi*에 속하는 곰팡이가 폴리케타이드 경로(polyketide pathway)를 통해 생산하는 디푸라노쿠마린 유도체(difuranocoumarin derivatives)에 속하는 곰팡이독소이다(표 1)(Varga, Frisvad and Samson, 2011). 특히 *A. flavus*, *A. parasiticus*는 전 세계 토양에 흔히 분포되어 있는 곰팡이로 온대지방에서는 잘 서식하지 않고 주로 고온 다습한 열대나 아열대 지방에 널리 분포한다. 이들 곰팡이들은 주로 쌀, 밀, 옥수수 등의 곡류, 견과류 및 향신류 등을 기질로 하여 독소를 생성하기 때문에 이러한 농작물이나 이를 가공한 식품 및 사료에서 아플라톡신이 검출되고 있다. 현재까지 알려진 약 20종 아플라톡신 가운데 아플라톡신 B_1, B_2, G_1, G_2가 흔히 자연계에서 발생한다(IARC, 2002; JECFA, 2008). 아플라톡신은 간을 비롯한 여러 장기에 이상을 유발하고 면역기능 억제 및 발암성을 나타내기 때문에 세계 각국에서는 다빈도 오염 식품을 대상으로 기준치를 설정하여 엄격하게 관리하고 있다(표 2).

기후 변화로 인해 온대 기후에 속한 유럽 일부 국가 및 미국 등에서 곰팡이독소의 발생이 증가될 것이라는 예측이 나오고 있다(Paterson and Lima, 2010). 즉, 현재 온대 지역의 기후는 아플라톡신 생산의 최적 기온과 유사한 아열대 기후로 바뀌어 아플라톡신에 민감한 것으로 알려진 농작물들(옥수수, 땅콩 등)의 오염 가능성은 더욱 커진다고 한다. 우리나라 국립기상연구소(2011)에서도 복사강제력의 정도에 따라 예측한 국제 표준 기후변화 시나리오인 RCP(Representative Concentration Pathway)에 근거하여 2100년까지 전망한 결과를 공표하였다. 이에 의하면 21세기말 RCP 8.5 시나리오 하에서는 대관령을 중심으로 인제, 홍천, 원주, 제천 등

* Corresponding author: Hyang Sook Chun
School of Food Science and Technology, Chung-Ang University, Ansung 456-756, Korea
Tel: +82-31-670-3290, E-mail: hschun@cau.ac.kr

을 제외한 전 지역이 아열대 기후지역에 포함될 것으로 전망하였다. 따라서 현재는 아플라톡신이 국내 농작물이나 관련 식품에 특별한 문제를 일으키지 않는 상황이더라도(표 3), 앞으로 이들 독소가 심각한 위해 요소로 작용할 수 있다. 뿐만 아니라 현재 우리나라의 경우 수입식품이 차지하는 비중은 전체 섭취열량 대비 65%, 유통량 대비 34.1%에 달하고 있고 향후 지속적으로 증가될 것으로 전망되고 있어 수입국의 기후변화를 고려한 식품의 안전관리가 요구되고 있다. 따라서 미래를 정확하게 예측하기는 어렵지만 기후변화와 아플라톡신에 관한 정보를 제공하고 식품안전관리에서도 장기적인 안목으로 정책을 수립할 수 있도록 본고에서는 국내 기후변화 시나리오와 향후 아플라톡신의 오염 예방을 위한 몇 가지 방안에 대해 소개하고자 하였다.

표 1. 아플라톡신 생성 *Aspergillus* section *Flavi* 곰팡이류

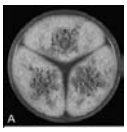
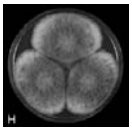
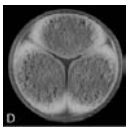
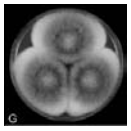
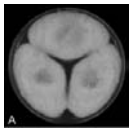
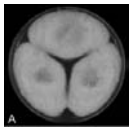
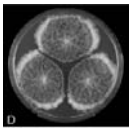
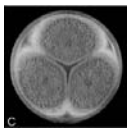
곰팡이 종류	아플라톡신 생성	발 생	주요 오염원	균 총
A. flavus	B_1 & B_2	Wide world	모든 식품	
A. parasiticus	B_1, B_2 & G_1, G_2	Australia, India, Japan South America, Uganda, USA	땅콩류	
A. arachidicola	B_1, B_2 & G_1, G_2	Argentina	땅콩류	
A. bombycis	B_1, B_2 & G_1, G_2	Indonesia Japan	누에고치	
A. minisclerotigenes	B_1, B_2 & G_1, G_2	Argentina Australia Nigeria USA	땅콩씨앗	
A. nomius	B_1, B_2 & G_1, G_2	Brazil, India Japan Thailand USA	꿀벌	
A. parvisclerotigenus	B_1, B_2 & G_1, G_2	Nigeria	땅콩	
A. pseudocaelatus	B_1, B_2 & G_1, G_2	Argentina	땅콩잎	

표 1. 아플라톡신 생성 *Aspergillus* section *Flavi* 곰팡이류

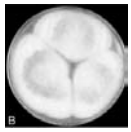
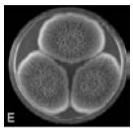
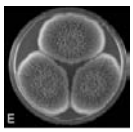
곰팡이 종류	아플라톡신 생성	발 생	주요 오염원	균 총
A. pseudonomius	B_1	USA	알칼리 꿀벌	
A. pseudotamarii	B_1 & B_2	Argentina Japan	토양	
A. togoensis	B_1	Central Africa	씨앗	

표 2. 세계 주요 국가의 아플라톡신의 기준치 관리 현황

국가	규제 식품	기준치 (μg/kg)
한국	영아용 조제식, 성장기용 조제식, 영·유아용 곡류조제식, 기타 영·유아식	B_1으로 0.1이하
	건조과실류	15
	밀가루	(단, B_1은 10 이하)
	육두구, 심황(강황), 건조고추, 건조파프리카 및 이를 함루한 천연향신료	
	장류 (메주 제외), 고춧가루 및 카레분	
	곡류가공품 및 두류가공품 (규격외 일반가공품)	
	곡류, 두류, 땅콩, 견과류 및 그 단순가공품 (분쇄, 절단 등)	
한국 (입안예고)	미숫가루/선식/생식	4 (B_1은 4)
	시리얼	4 (B_1은 2)
CODEX	아몬드, 헤즐넛, 피스타치오넛 (가공) 8 단계	10
	아몬드, 헤즐넛, 피스타치오넛 (비가공) 8 단계	15
	땅콩 (비가공)	15
EU	곡류 및 그 가공품 (옥수수 및 영유아용제품 제외)	4.0 (B_1은 2.0)
	향신료 (고추속, 후추속, 육두구, 생강, 심황)	10.0 (B_1은 5.0)
	건조과실류 및 그 가공품 (직접 섭취되거나 식품의 원재료로 사용되는 것)	4.0 (B_1은 2.0)
	건조과실류 (섭취 또는 식품의 원재료로 사용되기 위하여 선별이나 물리적 처리가 필요한 것)	10.0 (B_1은 5.0)
	땅콩, 견과류 및 그 가공품 (섭취 또는 식품의 원재료로 사용하기 위하여 선별이나 물리적 처리가 필요한 것)	4.0 (B_1은 2.0)
	견과류 (직접 섭취되거나 식품의 원재료로 사용하기 위하여 선별이나 물리적 처리가 필요한 것)	10.0 (B_1은 5.0)
	땅콩 (섭취 또는 식품의 원재료로 사용하기 위하여 선별이나 물리적 처리가 필요한 것)	15.0 (B_1은 8.0)
	옥수수 (섭취 또는 식품의 원재료로 사용하기 위하여 선별이나 물리적 처리가 필요한 것)	10.0 (B_1은 5.0)
	건조과실류 및 그 가공품	4
	영유아용 곡류가공품 및 이유식	0.1(B_1으로)
미국	브라질넛 식품, 땅콩과 그 가공품, 피스타치오	20 (B_1+B_2+G_1+G_2)
일본	피스타치오, 아몬드, 브라질넛, 케슈넛, 헤이즐넛, 마카다미아, 호두, 옥수수, 땅콩 및 그 가공품	10 (AFB_1)
호주	땅콩, 견과류	15 (B_1+B_2+G_1+G_2)
캐나다	땅콩제품	15 (B_1+B_2+G_1+G_2)

표 3. 국내 아플라톡신 오염 현황

검사항목	분석결과	참고문헌
식용유지류 110건 영유아용 식품 106건	불검출 5건에서 B_1 0.06~0.14 ppb 검출	조 등, 2010
향신료 10종 179건 및 건조과실류 137건	건망고, 건딸기류, 건키위 및 건파파야에서는 불검출 건자두 - 평균 0.29, 건포도 - 평균 0.09 검출 건살구 - 평균 0.07 ppb 검출 건무화과 - 총 20건 중 3건에서 최고 0.564 ppb 검출 곶감 - 15건 중 3건에서 G_1 최고 0.88 ppb 검출 육두구 - 평균 2.6 ppb 검출 카레 - 평균 1.0 ppb, 최고 5.4 ppb 검출 심황 - 평균 0.5 ppb, 최고 1.3 ppb 검출 고춧가루 - 평균 1.0 ppb, 최고 5.9 ppb 검출 파프리카분말 - 평균 0.5 ppb, 최고 1.3 ppb 검출	박 등, 2008
곡류, 곡류가공품, 견과류, 견과류가공품, 향신료, 두류, 영유아용식품 등 총 719건	땅콩, 떵콩버터, 기장, 미숫가루, 엿기름, 카레, 된장, 고추장, 깨 등 59건(8.2%)에서 B_1으로는 0.04~4.45, 총 아플라톡신으로는 0.04~5.51 ㎍/kg 수준으로 아플라톡신이 검출	김 등, 2006
곡류와 견과류 등 140 종	곡류 - 44개 중 16개(38%, 0.07~17.76 ppb) 검출 견과류 - 44개 중 17개(49%, 0.16~44.81 ppb) 검출 향신조미료 - 44개 중 10개(29%, 0.96~8.46 ppb) 검출 주류 - 44개 중 1개(14%, 0.82 ppb) 검출	정 등, 2005
견과류, 국산 11점과 수입산 74점	31개 시료에서 LOD~28.24 ppb 검출	정 등, 2005
견과류 및 그 단순가공품 300건	B_1 - 3.7%, G_1 - 0.7% 검출, B_2 & G_2는 불검출 B_1 검출 식품 - 땅콩버터, 된장, 0.5~2.5 ppb G_1 검출 식품 - 땅콩버터, 메주가루, 0.8~1.1 ppb B_1 & G_1 최고검출농도는 각각 2.5 ppb와 1.1 ppb	이 등, 2002

기후변화 시나리오

기후변화는 지역적 특성과 사회경제적 변수, 기상변수 등 다양한 요인에 의해 이루어지기 때문에 몇 가지 시나리오를 구성하여 예측이 이루어진다. UN 산하기구인 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)에서는 인구통계와 사회경제적 발전 등에 따른 온실가스 농도 변화를 예측한 온실가스 배출 시나리오를 기반으로 지금까지 4차에 이르는 보고서를 발표하였다. 그러나 발간 예정인 5차 평가보고서에서는 인간 활동이 대기에 미치는 온실가스 농도인 복사강제력을 기초로 사회-경제 여건변화와 연계한 신 기후변화 시나리오(RCP)를 설정하였다. RCP 시나리오는 복사강제력의 정도에 따라 RCP 8.5, RCP 6.0, RCP 4.5, RCP 2.6 등 네 가지 유형으로 시나리오를 구분하고 있다(표 4). 이에 따르면 20세기 말(1971~2000) 대비 21세기 말(2071~2099) 기후변화는 RCP 4.5 시나리오의 경우 기온은 2.8℃ 상승, 강수량은 4.5% 증가할 것으로, RCP 8.5 시나리오에서는 지구평균 기온은 4.8℃ 상승, 강수량은 6% 증가할 것으로 전망하고 있다(표 5). 한국 국립기상연구소(2011)에서도 IPCC 5차 평가보고서 및 국내 기후변화 대응을 위하여 신 기후변화 시나리오인 RCP에 근거하여 2100년까지 기후변화 전망 결과를 산출하여 공표하였다. 국내의 경우 기후변화 완화를 위한 노력없이 현재 추세로 온실 가스 배출이 계속되는 RCP 8.5 시나리오 하에서는 21세

표 4. IPCC 5차 평가보고서의 신 기후변화 시나리오

구분	복사강제력[a]	농도[b]	경로형태	2100년 CO_2 농도 (ppm)	SRES[e]와 비교(ppm)
RCP8.5[c]	2000년에 8.5 W/m² 이상	2100년에 1,370 CO_2 이상	상승	940	A2(830)~A1FI(970) A2: 다원화 사회
RCP6.0	2100년 이후 8.5 W/m²이하 안정화	850 CO_2 까지 (2100 이후 안정화)	안정화	670	B2(600)~A1B(720) A1B: 고성장 사회
RCP4.5[d]	2100년 이후 4.5 W/m²이하 안정화	650 CO_2 까지 (2100 이후 안정화)	안정화	530	B1(550) B1: 지속 발전형 사회
RCP2.6	2100년 이전 3 W/m²에서 최고 도달 이후 하강	2100년 이전 490 CO_2로 최고 도달 이후 하강	절정&하향	420	인간활동에 의해 회복 가능한 사회(실현불가능)

a) 복사강제력 값은 모든 인위적인 온실가스와 다른 강제력 작인의 순 효과임.
b) CO_2 상당(CO_2-eq) 농도로서 농도=278×exp(forcing/5.35)식으로 계산됨.
c) RCP8.5는 BAU 시나리오로서, 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우임.
d) RCP4.5는 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현되는 경우에 해당되는 시나리오임.
e) SRES(Special Report on Emission Scenario) : IPCC가 경제개발속도, 인구증가율, 기술발전 정도, 화석연료 의존도 등에 따라 작성한 미래 시나리오
자료: 국립기상연구소, 2011.

표 5. 21세기 말 지구와 한반도의 평균기온 및 강수량 변화 전망

RCP 시나리오		RCP 4.5 (540ppm)	RCP 8.5 (940ppm)
지구 평균	기온(℃)	+2.8℃	+4.8℃
	강수량(%)	+4.5%	+6.0%
한반도 평균	기온(℃)	+3.4℃	+6.0℃
	강수량(%)	+17.3%	+20.4%

기 말(2070-2099) 한반도 평균 기온은 6.0℃ 상승하고 강수량은 20.4% 증가할 것으로 전망되었다(표 5). 또한 대관령을 중심으로 인제, 홍천, 원주, 제천 등을 제외한 전 지역이 아열대 기후지역(평균기온 10℃가 넘는 달이 1년 중 8개월을 넘는 경우 아열대 기후로 정의)에 포함될 것으로 예측되었다(그림 1).

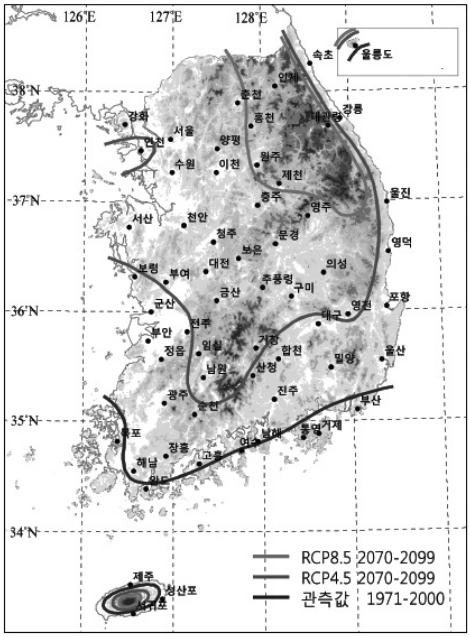
실선은 각각 관측 자료에서 구한 현재(1971~2000)의 아열대지역 경계(검정색)와 RCP 시나리오에서 전망한 2070~2099년의 아열대 지역 경계(RCP4.5: 보라색, RCP8.5: 붉은색)를 의미한다.

기후요인와 아플라톡신

농작물 재배 시(추수 이전)의 아플라톡신 오염

열대 및 아열대 지방에 추수 무렵 비가 내리면, 많은 농작물에 고농도의 아플라톡신이 발생한다. 아플라톡신의 발생 정도는 여러 가지 요인에 따라 많은 차이가 있으나 열대 국가에서는 건조 및 가뭄 등 기상 변화로 인해 오염된 식품을 먹고 급성 아플라톡신 중독에 걸리거나 사망하는 일이 최근에도 발생하고 있다(Lewis 등, 2005).

일반적으로 성장하고 있는 농작물은 환경적 요인들이 곰팡이가 성장 및 농작물의 감수성을 증가시키지 않는 한, *A. flavus*에 저항성을 나타내기 때문에 아플라톡신에 쉽게 감염되지 않는다. 곤충이나 조류 및 기타 물리적 작용(예, 우박)에 의해 손상을 입거나 고온의 건조 상태에 노출되면 추수 이전에 상당히 많은 농작물들이 곰팡이에 감염된다. 또한 기후는 직접적으로 숙주 감수성에 영향을 미친다. 예를 들어, 피스타치오는 고온이나 건조 상태에 노출되면 껍질에 균열("early split")이 생기기 시작하며, 피토알렉신의 생성이 감소되어 농작물의 질병 감수성을 증가시킬 수 있다. 또한 옥



<그림 1> 기후변화 RCP 시나리오 기반 아열대 지역 변화 전망.

수수 병인 "silk cut"이 증가되면 옥수수 낟알의 손상을 야기하게 된다(Cotty and Jaime-Garcia, 2007). 앞서 기술한 모든 경우에 있어 아플라톡신 오염은 더욱 증가한다. 미국 중서부에서 발생했던 경우와 같이 일반적으로 독소가 존재하지 않았던 지역에서도 고열을 동반한 가뭄 상태에 지속적으로 노출이 되면 오염이 발생할 수 있다. 마지막으로 추수 전 단계 동안 형성된 곰팡이 community는 추수 후 저장 단계의 오염정도에 큰 영향을 미치며 추수가 지연되는 상황에서 추수 바로 전 혹은 추수 기간 동안 비가 내리면 농작물들이 받는 타격은 매우 크다(Jaime-Garcia and Cotty, 2003).

주요 농작물 생산국에서는 식물 질병에 대한 날씨의 영향 여부를 전망하기 위해 노력하고 있다. 하지만 실제 발생한 오염과 예측 내용이 항상 일치하는 것은 아니다. 이 때문에 농작물의 계절적 특성과 지역의 날씨 현상을 고려하는 계절별 관측 자료가 요구된다. 전반적인 농작물 오염에 대해 기후가 미치는 영향력을 정확히 진단하는 작업은 매우 복잡하며 때로는 매우 까다롭다. 따라서 기후 변화의 영향력을 규명하는 일은 매우 어려울 것이다. 일반적으로 학자들은 기후 변수들이 농작물에 미치는 영향을 평가하기 위해 소규모의 실험 혹은 현장 조사를 실시한다. 고온 건조 혹은 가뭄 상태에서는 일부 농작물들의 오염이 증가하며 곤충에 의한 손상도 농작물들이 기후 변화에 의해 촉진된 질병에 걸리는 확률을 높이는데 중요한 역할을 한다. 이러한 연구 결과들을 토대로 전반적인 농작물 오염에 대한 특정 기후 요소의 상대적 중요성을 평가하는 것과 광범위한 지역에서 어떻게 기후 요인들이 상호 작용하여 오염 분포를 결정하는지를 예측하는 것은 결코 쉬운 일이 아니다. 따라서 소규모 연구에서 도출된 결론들이 부정확하다는 것은 자연스러운 결과다(Jaime-Garcia and Cotty, 2003).

오랜 기간 동안 광범위하게 발생한 오염에 대한 기후의 영향력을 보다 쉽게 파악하기 위해 2가지 수학적인 방법이 사용되고 있다. 공간 분석(Geostatistics과 통합된 지리 정보 시스템)과 다중 회귀 분석은 지역 수준에서 오염에 대한 다중 기후 요소의 관계를 파악하는데 유용하게 사용된다. Geostatistics를 곰팡이독소 문제에 적용하는 것은 "물리적 위치로 표현된" 데이터가 요구되기 때문에 한계가 있다. 일반적으로 특정 지역의 오염 발생에 대한 자료를 제공하기를 꺼리는 경향이 있다. 그럼에도 불구하고 텍사스 남부 지역의 한 착유 회사는 5년 동안 4만 5천 km^2내에 분포되었던 아플라톡신에 대해 3만 6천 개의 물리적 위치로 표현된 수치를 제공하였다. 제공된 데이터 분석을 통해 목화씨의 아플라톡신 오염은 시간적, 공간적 차이가 있으며 오염과 강우량 간에 양의 상관관계가 있음이 파악되었다(Jaime-Garcia and Cotty, 2003).

기상 변화는 관개 조건, 농작물 윤작, 최적의 농작물 재배 시기 및 농작물 오염도에 영향을 미칠 수 있다. 뿐만 아니라, 비는 추수 작업을 방해하고 '적정 농작물 건조' 시기를 늦춘다. 이와 같은 변화로 인해 치명적인 아플라톡신 중독을 일으켰던 옥수수 오염 사건과 같은 심각한 사건들이 발생했다(Krishnamachari, Bhat, Nagarajan and Tilak, 1975; Lewis 등, 2005). 아플라톡신을 생성하는 곰팡이의 양 또한 기후에 따라 달라진다. 이러한 곰팡이들은 서늘한

기온(최저 20°C)에서는 성장을 거의 하지 않으며 아플라톡신을 생성하는 곰팡이가 공기, 토양 및 농작물에 흔하게 존재하는 더 기온이 높은 지역(최저 25°C)과 비교하여 *A. flavus*의 양도 낮은 수준을 나타낸다(Shearer, Sweets, Baker and Tiffany, 1992). 따라서 기온이 상승하는 쪽으로 변화하면 아플라톡신 농도도 증가할 것으로 보인다. 기온이 높은 기후에서 자라는 농작물들은 아플라톡신을 생성하는 곰팡이에 의해 오염될 가능성이 더 높으나, 일부 지역에서는 가뭄을 동반한 고온 현상이 나타날 때만 오염이 발생한다 (Sanders, Blankenship, Cole and Hill, 1984; Schmitt and Hurburgh, 1989). 아플라톡신을 생성하는 곰팡이들은 열대 지방, 온대 지방, 건조 지방 및 반건조 지역에서 서식하는데, 기후 변화로 인해 이들 곰팡이의 양에 큰 변화가 생기고 있다(Bock, Mackey and Cotty, 2004). 기후는 아플라톡신을 생성하는 곰팡이의 양뿐만 아니라 "종류"에도 영향을 미친다(Horn and Dorner, 1999).

기후가 온대에서 아열대로 변하고 기상 패턴이 변덕을 부릴수록 농작물 수확 시 아플라톡신 오염도는 증가될 것으로 보인다. 아프리카, 아시아, 아메리카 지역에 걸쳐 분포하는 옥수수는 매우 오랫동안 기온이 높은 지방의 주요 농작물로 활용되어 왔다. 옥수수는 특히 기후 변화에 민감한데, 한 예로 케냐에서는 최근 치명적인 아플라톡신 중독이 발생하였다(Lewis 등, 2005). 따라서 앞으로 많은 사람들이 예기치 못한 수준의 아플라톡신에 노출되지 않도록 신뢰할 수 있는 대안들이 요구된다. 아플라톡신 안전관리 기술, 해독화 기술, 농작물 재배 패턴의 변화 등은 모두 가능성 있는 대안들이다. 동시에, 비록 기후 변화의 영향을 최소화하기 위해서는 기후 변화로 인해 발생할 수 있는 변화들을 사전에 예측하는 적극적인 태도가 요구된다.

농작물 추수 후 아플라톡신 오염

아플라톡신의 오염이 발생할 수 있는 두 번째 단계는 농작물 완숙기에서 소비 단계까지이다. 성장이 끝난 농작물들은 경작지와 수송과 저장 과정에서 따뜻하고 수분이 많은 환경에 노출될 수 있다. 습도가 높으면 기질의 수분과 온도가 오염에 영향을 미치기 때문에 오염도를 증가시킨다. 아플라톡신을 생성하는 곰팡이가 선호하는 조건에 대해서는 많은 연구가 이루어졌다.

곡물에는 곰팡이독소를 생성하는 곰팡이를 포함하여, 기후 변화에 영향을 받는 세균, 효모, 사상균과 같은 많은 미생물이 존재한다. 안전한 농작물 저장에 영향을 미치는 요인들 간 상관관계를 조사한 결과, 온도, 수분활성도, 가스 생성과 같은 핵심 환경 요인은 곰팡이에 의한 부패율 및 곰팡이독소 생성에 영향을 미친다. 일반적으로, 곡물을 수분활성도 0.7 이하 조건에서 저장하면 부패는 발생하지 않는다. 하지만 기후 변화를 유도하여 이 조건에 보다 쉽게 도달할 수 있으면, 곰팡이와 그 독소들을 보다 쉽게 억제할 수 있다. 또한, 저장 건축물을 안전한 범위에서 유지할 수 있는 농가들은 단지 에너지 소비 증가에 따른 비용 상승만을 경험할 수 있다 (Wallace and Sinha, 1981).

기후변화 시나리오에 따른 아플라톡신의 오염도 예측

기후변화가 식품안전을 위협할 수 신종 위해요인으로 인식됨에 따라 유럽에서는 2011~2100년의 현행, +2℃와 +5℃ 기후 시나리오를 이용하여 재배되는 옥수수, 밀, 쌀에 대해 아플라톡신 오염도 변화를 전망하였다(EFSA, 2012). 옥수수에서 아플라톡신 오염에 대한 위험 지수는 주로 +2℃의 시나리오에서 증가할 것으로 전망되었다. 이 시나리오에서 아플라톡신 위험이 분명하게 증가되는 곳은 스페인의 중앙과 남부, 터키를 포함한 이탈리아의 남부와 발칸반도와 같이 전형적인 유럽의 농업 지역이었다. 밀의 경우, 현 기후 시나리오에서는 일부 루마니아, 폴란드, 헝가리, 슬로바키아 지역에서 제로보다 약간 높은 위험 지수가 관찰되었다. +2℃ 기후변화 시나리오의 경우, 위험 지수는 비슷했지만 지역이 다소 넓어졌다. +5℃ 기후변화 시나리오에서는 아플라톡신 오염에 대한 위험이 북상하는 지역이 관찰되었지만 위험 지수는 모두 40 이하로 낮았다.

국내의 경우 기후변화 대응 식품안전관리 연구사업단에서 주요 곰팡이독소 오염 기여 식품인 쌀, 옥수수, 고추 등을 대

상으로 한 연구가 진행 중에 있다. 먼저 쌀, 옥수수의 경우 현재 오염도 데이터의 제한성으로 인해 아플라톡신 오염도 예측이 어려워 데이터를 축적하고 있는 중이다. 고추는 연구가 완료되지는 않았으나 현재(2003~2012)년도 기상자료와 RCP 8.5 시나리오에 의하여 예측된 기상자료를 바탕으로 추정한 아플라톡신 B_1의 독소량을 잠정 예측하였다. 고추 수확 시기의 변동성을 감안하여 9월, 10월, 11월로 구분하여 예측한 결과, RCP 8.5 시나리오에 의하면 2090년대의 9월, 10월, 11월은 강수량은 현재보다 낮지만 기온이 크게 증가한다. 9월은 강수량 변화에 더 큰 영향을 받아 독소가 조금 감소하지만, 전체적으로 지구온난화의 영향이 뚜렷한 10월, 11월에는 온도변화에 더 큰 영향을 받아 독소 생성량이 점진적으로 늘어나는 것으로 예측되었다. 그러나 이와 같은 결과는 2년간의 모니터링 결과를 기반으로 예측된 것이기 때문에 신뢰성 있는 예측 결과를 얻기 위해서는 데이터를 추가적으로 확보해야 한다.

아플라톡신 예방관리

추수 전 아플라톡신 예방관리

대표적인 아플라톡신 다빈도 오염 식품인 옥수수와 너트류의 아플라톡신 오염 방지 및 저감화에 이용되는 방법은 표 6에 요약하였다. 고온지역 및 재배기간 중 강수량이 매우 적은 지역에서는 관개농법이 수행되어야 하며, 나무의 스트레스를 최소화하기 위해 관개에 사용되는 용수가 열매와 잎에는 접촉되지 않도록 조심해야 한다. 관개 및 기타 목적(예, 잔류농약 스프레이 제조)으로 이용되는 용수의 품질은 각 국가의 법령에서 정한 규정에 따라 적합해야 한다. 아플라톡신은 온도가 상승할수록 증가하므로 조기 파종함으로써 등숙기 후기단계 동안 온도로 인한 영향을 줄일 수 있다. 적합한 작물 영양과 충분한 수준의 질소는 수확 전 작물의 아플라톡신 오염 예방에 필수적이다. 질소는 식물 대사와 활력에 큰 효과를 줄 수 있다. 인, 칼륨, 칼슘과 같은 영양분의 결핍은 식물 병원체에 의한 작물의 감수성을 증가시킨다. 또한, 살충제(insecticide), 살균제(fungicide), 제초제(herbicide), 진드기 구제제(acaricide) 및 살선충제(nematocide)를 포함하여 농작물에 사용이 승인된 잔류농약은 곤충, 곰팡이 감염, 과수원과 인접한 지역의 기타 해충으로 야기된 손상을 최소화할 수 있다. 뿐만 아니라 사용된 모든 농약에 대해서는 정확하게 기록을 하고 보관해야 한다. 수확 전 아플라톡신 오염을 증가시키는 요인 중 하나로 곡물의 해충 피해를 꼽을 수 있는데 가장 효과적인 방법은 해충에 내성을 갖는 교잡종을 파종하는 것이다. 경운(tillage)과 심토경운(subsoiling)은 아플라톡신을 감소시킬 수 있는 방법으로 두 방법 모두 아플라톡신 오염을 감소시키는데 효과적이나 심토경운이 더 효과적이라고 한다(Payne GA, Cassel DK and Adkins CR, 1986).

추수 후 유통단계별 아플라톡신 예방관리

추수 후에도 너트류의 경우 다양한 곤충들이 동면할 수 있는 장소를 최소화하기 위해 수확 후 동절기에 나무에 남아있는 잔존물은 제거해야 한다. 나무는 필요에 따라 가지를 잘라내고, 재배기간 이전에 적절한 농약을 살포해야 한다. *Aspergillus* 곰팡이의 콜로니화를 감소시키기 위해 수확과정 이후 경작지 바닥의 깔짚 및 부스러기를 제거해야 한다. 수확과정에서 곰팡이, 화학물질, 비료, 독성물질 등의 오염을 최소화하기 위해 이용된 콘테이너, 장비 및 기기는 깨끗한 용액으로 세척하여 저장해야 한다. 매년 농작 시 온도, 수분 및 습도 등의 수치를 기록하고 매 계절마다 사용한 수확과 저장방법 및 전통적 방법과 비교하여 변화나 차이점들을 기록해 둔다. 동 정보는 특정 곡물을 경작한 한 해 동안의 곰팡이성장과 곰팡이 독소의 원인들을 설명하고 향후 유사한 실수를 방지하는 데 매우 유용하다.

아플라톡신 다빈도 오염 가공식품의 관리

가공의 모든 단계에 종사하는 자는 개인위생을 지속적으로 청결하도록 유지하고, 가공 시 적합한 의복을 착용해야 한다. 또한, 가공시설을 잘 운영할 수 있도록 적절한 수준에서 식품위생 및 일반적인 위생 절차에 대해 훈련을 받아야 한다. 가공 공정에서 아플라톡신의 오염을 최소화하기 위해

표 6. 추수 전 아플라톡신 오염 저감화 기술 요약

전략	방법	연관성
회피	조기 경작, 관개	열과 가뭄 스트레스 감소
토양의 비옥화	적절한 영양 공급	질소부족 옥수수는 더 민감함
살충제 사용	경작물마다 적절한 시기에 사용	곤충으로 인한 옥수수 이삭의 피해 감소
교잡종(hybrid) 선택	곤충이나 가뭄에 자연 저항성을 가진 Bt-hybrides or hybrids 사용	이삭의 곤충이나 가뭄에 대한 내성 증가
생물학적 제어	*A. flavus*의 비독성 분리균주 사용	경쟁적 배제기능을 이용하여 독성균주 감소
토양관리	작물 잔류물을 경운으로 토양투입	접종 밀도 감소
예측	기상 및 곰팡이 / 독소 발생 예찰 시스템 적용	곰팡이 및 독소 생성 예측을 통한 예방관리
안전관리기법 적용	우수농업규범(Good Agricultural Practices, GAPs) 적용	재배과정 중 화학물질 및 미생물에 대한 관리

필요한 모든 사전예방조치에 대해 모든 직원이 인식할 수 있는 시스템을 구축해야 한다. 원재료를 수납 또는 저장하는 장소는 최종제품을 제조 또는 포장하는 장소와 분리되어 있어야 한다. 농작물의 외피를 벗기는 작업은 주요 가공장소와는 분리된 지역에서 수행되어야 한다. 공장의 기타 영역에 먼지가 낀 공기가 환기시스템 또는 기타 통로로 작업장에 혼입되지 않도록 특별한 주의를 기울어야 한다. 가공업자는 우수품질관리(good quality control)와 추적시스템(traceability/product tracing)을 적용해야 하며 모든 가공단계에서 다양한 롯트간의 아플라톡신의 교차오염을 방지하기 위한 안전한 방법으로 수행되어야 한다. 외피를 벗기는 작업은 수확 후 가능한 한 빨리 이뤄져야 한다. 외피 벗기기 작업이 약간 지연될 것으로 예상되는 경우 곤충, 진드기, 해충, 가축, 곰팡이, 화학물질 또는 위해미생물, 찌꺼기 및 먼지를 예방할 수 있는 조건에서 저장되어야 한다. 껍질이 벗겨진 알곡은 가능한 한 신속하게 건조시켜야 한다. 건조율과 열의 강도는 최종제품의 용도에 따라 결정되어야 한다. 수분함유량은 대표 샘플을 채취하여 건조한 이후 바로 검사해야 한다. 향후 아플라톡신의 잠재적인 오염을 감소시키기 위해 건조기를 이용해야 하며 적절한 품질의 용수를 이용하고, 재활용하면 안 된다. 가공시설에서 껍질 벗기기, 선별, 가공준비, 건조, 저장영역에 위치한 직원 및 기구는 다른 시설지역으로 옮겨서 사용되어서는 안 된다. 폐기물은 작업지역에서 자주 제거해줘야 하며, 적절한 폐기물 저장소를 설치해야 한다. 결함이 있는 낟알과 이물질은 다양한 매뉴얼(manual) 및/또는 전자선별기술을 이용하여 제거한다. 배설물, 해충의 침입, 부패 및 기타 결함 요인이 확실히 제거되기 전까지 사용해서는 안 된다. Cracking 이후의 알맹이 수분함량은 건조한 공기로 환기시킴으로써 곰팡이가 성장하지 않는 수준으로 즉시 낮춰야 한다. 최종 가공제품(날 것, 껍질 벗긴 것, 껍질 안벗긴 것, 벌크 상태, 소비자가 바로 섭취할 수 있는 상태)은 수분함량이 적절해야 하며, 부패(decay), 곰팡이형성(mold), 효소작용에 따른 심각한 변질 없이 일반적인 운송 및 저장조건하에서 품질을 유지할 수 있도록 포장되어야 한다. 이와 같은 관리의 정도 및 형태는 다양한 제품과 관리의 필요성에 따라 달라질 수 있다. 운송 컨테이너는 청결하고 건조한 상태이어야 하며, 시각적으로 곰팡이 성장, 곤충 및 기타 오염물질이 보여서는 안 된다. 여러 롯트 또는 서브롯트가 같이 운송될 경우 롯트의 확인번호를 지속적으로 관리할 수 있는 방법으로 물리적 분리를 해야 한다. 롯트는 첨부문서(롯트의 확인번호는 첨부문서에 언급된 확인번호와 동일해야 한다)를 통해 제품을 추적할 수 있도록 지워지지 않은 것으로 확인번호를 표시해야 한다.

저장관리

저장시설은 청결하고 건조된 상태이어야 하며 비, 설치류 및 조류의 침입, 지하수 오물의 혼입을 방지할 수 있도록 환기가 잘 이뤄지는 구조를 갖춰야 하며, 온도 및 습도가 잘 변

표 7. 추수 후 아플라톡신 오염 저감화 기술 요약

전략	방법	연관성
회피	사용 기구 및 용기 세척	곰팡이 등 오염 최소화
분리	결함 곡물/제품을 수동/기계로 분리	아플라톡신 오염 최소화
저장환경 조절	적정 저장 조건 유지(0℃~10℃사이로 유지, 수분활성도 0.7 이하 등)	곰팡이 및 아플라톡신 등 오염 최소화
종사자 교육	아플라톡신 저감 위생교육	원료입고-생산에 이르기까지 위생교육으로 아플라톡신 오염 사전예방
롯트 및 제품 식별	가공 시 추적시스템(traceability/product tracing) 적용	가공단계에서 다양한 롯트간의 아플라톡신의 교차오염 방지
안전관리기법 적용	우수제조규범(Good Manufacturing Practices, GMPs), 우수저장규범(Good Storage Practices, GSPs), 위해요소중점관리기준(HACCP) 적용	저장 및 가공 과정 중 아플라톡신 오염 최소화

동되지 않도록 유지한다. 가능한 한 온도는 저장과정 중 곰팡이 성장을 최소화하기 위해 0℃~10℃사이로 유지해야 한다. 우수저장규범은 저장시설에서의 곤충 및 곰팡이 수준을 최소화하기 위해 시행되어야 한다. 동 실행규범에는 적절하고 등록된 살충제, 살균제 및 적절한 다른 방법의 사용이 포함되어야 한다. 마대자루에 저장된 곡물은 좋은 환기시설 및 출입이 가능한 깔판(pallet)에 위치해야 한다. 저장과정 중의 수분함량 및 온도를 달리한 수분활성도는 주의 깊게 관리해야 한다. *A. flavus/A. parasticus*는 수분활성도 0.7 이하에서 아플라톡신을 발생 또는 성장이 어렵다. 훈증된 곡물은 수출을 위해 저장 공간에서 이동되므로 선적과정 중 해충의 혼입 및 오염을 방지할 수 있도록 모든 저장시설의 관리에 특별한 주의를 기울여야 한다(CODEX, 2008).

안전관리 시스템 적용

위해요소중점관리기준(HACCP)제도는 생산 및 가공시스템에서 위험요소를 확인 및 관리하기 위해 적용되는 식품안전관리제도이다(FAO, 1995). HACCP의 일반원칙은 다른 문서에도 잘 설명되어 있다. 식품안전관리제도로써의 HACCP 적용은 식품업계의 일부 분야에서 이용된 관리통제 시스템보다 훨씬 더 많은 장점이 있다. 농작물의 경우 환경인자와 관련된 아플라톡신 오염에 영향을 미치는 다양한 인자(예, 날씨, 곤충)가 존재하나 이는 관리하기가 힘들거나 불가능하다. 수확이후에는 저장과정 중 발생된 곰팡이가 생성한 아플라톡신에 대해서 중점관리기준으로 확인할 수 있다. 예를 들어, 중점관리기준은 건조과정의 마지막 단계이며 중점한계는(critical limit) 수분함량 또는 수분활성도이다.

우수제조규범(Good Manufacturing Practices, GMPs)과 우수저장규범(Good Storage Practices, GSPs)은 HACCP 시스템을 구축 및 시행하기 이전에 적용되어야 하는 프로그램이다. 1999년 3월, 튀니지아에서 개최된 곰팡이독소에 관한 제3차 국제 컨퍼런스에서, 일반 권장사항중의 한 가지는 곰팡이독소에 대한 종합적인 프로그램의 일환으로 식품과 동물사료 중의 곰팡이독소 오염 제어를 위해서는 HACCP 원칙을 포함해야 한다는 것이다. HACCP 원칙을 실행함으로서 각 곡류의 생산, 취급, 저장 및 가공 시에 실행 가능한 예방 관리를 통하여 곰팡이독소의 오염을 최소화할 수 있을 것이다. 모든 국가에서 효율적인 통합 곰팡이독소 관리시스템을 설정하기 위한 전문가들을 확보하고 있지 않으므로, FAO는 개발도상국을 대상으로 HACCP 접근 및 이에 대한 적용을 위해 전문가 교육 프로그램을 우선적으로 실시하고 있다(FAO, 2002).

아플라톡신 예방을 위한 통섭적 접근 전략

향후 기후변화를 포함한 환경변화에 대한 아플라톡신의

오염 예방을 위해서는 각 접근방법을 다면적, 포괄적, 체계적으로그리고 상호보완적으로 고려하는 통섭적 전략이 필요하다고 본다. 이와 같은 전략은 생산자, 소비자, 정책 관리자 등 각 주체별, 식품의 생산, 가공, 저장 및 유통, 수비, 수출 및 수입 등 각 단계별로 다르게 수립해야 할 것이나 전체적으로 12가지 요인으로 나누어 그림 2에 제시하였다.

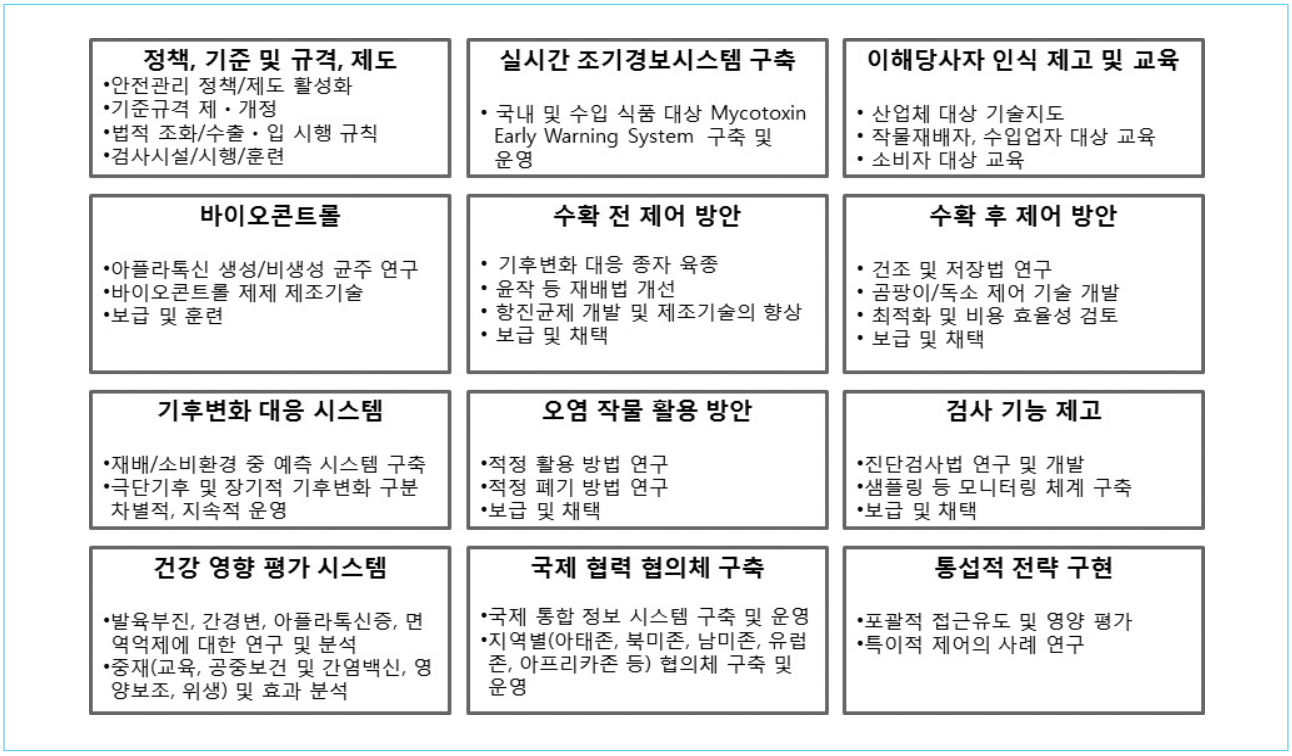
정책, 기준 및 규격, 제도 등의 측면에서는 아플라톡신 오염 대상 식품에 따른 기준치의 차등 적용이 요구되고, 생산자 및 산업체의 기후변화 대응 식품안전관리(GAP, GMP, HACCP, 식품이력추적제도 등) 제도의 안정적 시행과 노력에 대한 정부차원의 적극 지원이 요구된다. 생산자 및 산업체에서는 자체 곰팡이 및 아플라톡신 등 독소관리 매뉴얼을 작성하여 실제 안전관리에 적용해야 한다. 비용대비 효율적인 관리 방법을 모색해야 한다. 또한, 식품 수입업자의 경우도 현지에서 관리 체크 리스트를 만들어 안전한 식품이 수입되도록 해야 할 것이다. 특히 유럽연합에서 시행되고 있는 수입식품의 신속경보체계와 같이 국내 생산 및 수입된 제품 각각에 대해 실시간으로 아플라톡신 오염을 알릴 수 있는 경보체계가 구축되고 운영되어야 할 것이다.

아플라톡신 오염 예방을 위해 기후변화 대응시스템을 선진화해야 한다. 단기적으로 이상기상, 병해충발생, 재해취약지대, 대처방안 등에 대한 정보를 통합적으로 수집, 관리할 수 있는 통합적인 관리시스템의 구축 필요하며 일원화된 기상재해 관리 조직 신설 및 전문 인력을 확충해야 한다. 국지적인 상세기상정보의 생산과 국지기상에 대한 예측력 제고 및 병해충, 잡초 등 위해요소에 대한 현장 모니터링 및 정보 확산이 필요하다. 통합적인 정보 수집 및 전파를 위한 전산 네트워크를 구축해야 한다. 극한기후 및 장기적 기후변화에 대해 각각 차별화된 위기관리를 위해 기상정보, 병해충발생 정보, 재해발생 정보 수집, 분석도구(software), 아플라톡신 오염 취약성 지도 등을 개발하고 기후변화 영향을 체계적으로 평가할 수 있는 연구기반(hardware)을 마련하여 장기적인 안목을 가지고 지속적인 운영이 이루어져야 할 것이다.

생산 및 산업 현장의 기후변화 적응능력의 향상을 위해서는 연구(중앙정부), 기술지도(지자체) 체계의 재정립 및 전문인력 양성 필요하고 중앙과 지방 사이의 신속한 정보 전달과 기상변화, 병해충 발생 등 지역정보를 체계적으로 수집, 관리할 수 있는 시스템을 재정비하고 확보해야 한다. 지역의 기상 관측망, 병해충 예찰망의 안정적인 운용을 위한 전문요원 확보, 농업인의 인식 및 적응능력 향상을 위한 지도 교육 강화 필요하며 기후변화 적응역량 향상을 위한 교육 및 위기대응 매뉴얼 개발한다. 사전적으로 안전한 재배지역 선정, 이상기상에 의한 피해의 사전 예방을 위해 지자체의 기상정보 활용 능력 향상시키고 기후변화 대응 컨설팅 전문 인력 확충 및 전문컨설팅 기관을 육성한다. 뿐만 아니라 소비자들이 식품을 선택, 보관, 조리 및 섭취 시 아플라톡신 오염 예방과 관련된 행동도를 높이기 위해 체계적인 교육을 주기적으로 실시해야 한다.

아플라톡신 오염 예방과 기후변화 적응 능력을 향상시키기 위해서는 아플라톡신의 바이오콘트롤, 진단검사법 개발, 건강영향 평가, 수확 전 및 수확 후 각종 제어기술 개발에 관한 연구가 이루어져야 한다. 예를 들어 아시아권 국가의 주식인 쌀에 대해 기후변화에 대응하여 온도상승과 건조한 환경에 적응할 수 있는 C4 라이스 개발 프로젝트가 국제미작연구소(IRRI)에서 진행되고 있다(McMennamy and O'Toole, 1983). 옥수수와 수수는 쌀보다 더 효율적인 광합성 체계를 갖고 있어서 쌀보다 단위당 산출량이 더 높다. 이와 같은 작물들은 광합성 시 4개의 탄소 원자로 분자를 구성하여 C4 식물이라고 불리는데, 쌀은 C3 식물로 분류된다. C4 라이스는 옥수수와 수수에 있는 C4 유전자 조작에 의해 쌀에서 이와 같은 특성이 발현되도록 조작한 것으로 기후변화에 가장 불리하게 영향을 받고 있는 메콩 델타지역 내의 높은 수확량을 유지하는데 도움을 줄 것으로 기대되고 있다. 뿐만 아니라 아플라톡신에 오염된 식품을 어떻게 폐기 및 재활용 할 수 있는가에 대한 연구도 필요하다고 본다. 관련 정부부처에서는 연구결과들의 최적화 과정과 효율성 검토를 통해 채택하고 각 현장에 보급되도록 해야 할 것이다.

선진국의 적응기술 및 주요 수입국의 기후변화 대응 현황 등의 정보교류를 통한 우리 대응능력의 수준을 향상시키고



<그림 2> 아플라톡신 오염 제어 요인별 전략

국제기관과 연대한 아플라톡신 오염 감시시스템을 구축해야 한다. 예를 들어 세계 각 지역별 아플라톡신 오염 취약성 지도와 곡류, 향신류, 커피 및 땅콩 등 식품별 세계 수급 변동 예측 모델을 작성해야 한다. 뿐만 아니라 기후변화 적응 아플라톡신 예방기술을 개도국에 공여함으로써 국제사회에서의 위상을 제고하고 국제공조체계를 공고히 함으로써 세계적인 기상이변으로 인한 식량위기로 발생 시 초래될 수 있는 사회, 경제적 혼란을 최소화해야 한다. 국제적인 아플라톡신 오염논쟁 관련 이해당사국 혹은 전문가 그룹 논의에 적극적 참여하고 국제적인 학술활동을 확대해야 할 것이다. 기후변화를 포함한 환경변화에 대한 아플라톡신의 오염 예방을 위해서는 앞서 기술한 모든 전략들에 대해 다면적, 포괄적, 체계적으로 그리고 상호보완적으로 접근하여 실천에 옮겨져야 할 것이다.

참고 문헌

1. Bock CH, Mackey B and Cotty PJ. 2004. Population dynamics of *Aspergillus flavus* in the air of an intensively cultivated region of south-west Arizona. Plant Pathology, 53(4), 422-433.

2. CODEX, Code pf practice for the prevention and reduction of aflatoxin contamination in dried figs, CAC/RCP 65-2008, 2008.

3. Cotty PJ and Jaime-Garcia R. 2007. Influences of climate on aflatoxin producing fungi and aflatoxin contamination, International Journal of Food Microbiology, 119, 109-115.

4. EFSA. 2012. Modelling, predicting and mapping the emergence of aflatoxins in cereals in the EU due to climate change, Scientific report submitted to EFSA, 2012.

5. FAO. 1995. The use of hazard analysis critical control point (HACCP) principles in food control. FAO Food and Nutrition Paper No. 58, Rome, 1995.

6. FAO/IAEA training and reference center for food and pesticide control, Manual on the Application of the HACCP System in Mycotoxin Prevention and Control. 2002. FAO Food and Nutrition Paper No. 73, Rome, 2002.

7. Horn BW and Dorner JW. 1999. Regional differences in production of aflatoxin B1 and cyclopiazonic acid by soil isolates of *Aspergillus flavus* along a transect within the United States. Applied and Environmental Microbiology, 65(4), 1444-1449.

8. IARC. 2002. Aflatoxins, IARC monographs, volume 82, 2002.

9. Jaime-Garcia R and Cotty PJ. 2003. Aflatoxin contamination of commercial cottonseed in south Texas. Phytopathology, 93(9), 1190-1200.

10. JECFA. 2008. Safety evaluation of certain food additives and contaminants, Sixty-eighth meeting of JECFA, WHO, Geneva, 2008.

11. Krishnamachari KAVR, Bhat RV, Nagarajan V and Tilak TBG. 1975. Hepatitis due to aflatoxicosis. An outbreak in western India. Lancet, 305, 1061-1063.

12. Lewis L, Onsongo M, Njapau H, Schurz-Rogers H, Luber G and Kieszak S. 2005. Aflatoxin contamination of commercial maize products during an outbreak of acute aflatoxicosis in eastern and central Kenya. Environmental Health Perspectives, 113(12), 1763-1767.

13. McMennamy JA and O'Toole JC. 1983. RICEMOD: a physiological based rice growth and yield model. In: IRRI Rearch Paper Series. International Rice Research Institute, Los Banos, the Philippines, 33.

14. Payne GA, Cassel DK and Adkins CR. 1986. Reduction of aflatoxin contamination in corn by irrigation and tillage. Phytopathology, 76, 679-684.

15. Paterson RRM and Lima N. 2010. How will climate change affect mycotoxins in food? Food Research International, 43(7), 1902-1914.

16. Sanders TH, Blankenship PD, Cole RJ and Hill RA. 1984. Effect od soil temperature and drought o peanut pod and stem temperatures relative to *Aspergillus flavus* invasion and aflatoxin contamination, Mycopathologia, 86, 51-54.

17. Schmitt SG and Hurburgh Jr. CR. 1989. Distribution and measurement of aflatoxin in 1983 Iowa corn. Cereal Chemistry, 66, 165-168.

18. Shearer JF, Sweets LE, Baker NK and Tiffany LH. 1992. A study of *Aspergillus flavus* and *Aspergillus parasiticus in* Iowa Crop Fields-1988-1990. Plant Disease, 76(1), 19-22.

19. Varga J, Frisvad JC and Samson RA. 2011. Two new aflatoxin producing species, and an overview of *Aspergillus* section *Flavi*, Studies in Mycology, 69, 57-80.

20. Wallace HAH and Sinha RN. 1981. Causal factors operative in distributional patterns and abundance of fungi: A multivariate study. In D. T. Wicklow & G. C. Carroll (Eds.), The fungal community - Its organisation and role in ecosystems (pp. 233-247). New York, USA: Marcell Dekker Inc.

21. 국립기상연구소. 2011. IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서.

22. 기상청. 2011. 한국기후변화백서.

23. 김소희, 이창희, 손영욱, 장미란, 최인선, 이상목, 조성혜, 박준식, 권은영, 이은진, 손상혁, 김대병. 2006. 식품 중 곰팡이독소류 실태조사 - 식품 중 총 아플라톡신 실태조사 - , 식품의약품안전청보고서, 10.

24. 농촌진흥원. 2012. 기후변화: 농업부문 영향과 대응방안.

25. 박건상, 오금순, 조태웅, 강경모, 백옥진, 강영운, 노기미. 2008. 향신료 및 건조과실류 중 아플라톡신 안전성 평가, 식품의약품안전청연구보고서, 12.

26. 조대현. 2010. 식용유지 및 영유아용식품 중 아플라톡신 실태조사. 식품의약품안전평가원.

27. 이종옥, 소유섭, 김미혜, 박성국, 정소영, 이윤동, 정계훔, 엄지윤. 2002. 식품 중 곰팡이독소 모니터링 연구(II)-식품 중 아플라톡신 오염도 조사-, 식품의약품안전청연구보고서, 6, 83-88.

28. 정덕화. 2005. 곰팡이독소의 국가안전관리체계구축을 위한 연구 -아플라톡신을 중심으로-, 국립독성연구원.

29. 정덕화. 2005. 아플라톡신의 식품 및 인체 모니터링연구(II) : TRC, 국립독성연구원.